

大扭曲叶片整体涡轮电解加工工艺研究

朱永伟^{1,2} 徐家文¹

(1 南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

(2 扬州大学机械工程学院,扬州 225001)

文 摘 研究用展成电解工艺进行大扭曲度整体涡轮叶片的机械加工,对涡轮叶片型面进行数据处理,用软件方式实现电解加工的多轴联动进给;分析叶片电解过程成形规律,合理设计阴极、流场,解决大扭曲叶片加工的叶背二次腐蚀、出口短路等关键工艺问题,试验可稳定达到工序精度要求,并可批量生产。

关键词 整体涡轮,大扭曲叶片,展成电解加工,工艺研究

Study on Electrochemical Machining of Integral Turbine With Big-Twisted Blades

Zhu Yongwei^{1,2} Xu Jiawen¹

(1 Institute of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

(2 Institute of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225001)

Abstract Electrochemical contour evolution machining (ECCM) is promoted to machine integral turbine with big-twisted blades. The twisted blades dispersed data is processed. The multi-axis cooperative movement numerical programs are designed. The shaping law is analyzed. The cathode and the flowing field are designed properly. Key process issues, such as short circuit in exit and the blade back corrosion are discussed. The effective means are given for solving these problems. Machining test is carried out and the blades can satisfy precision demand. The integral turbine with big-twisted blades can be produced in batch.

Key words Integral turbine, Big-Twisted blades, Electrochemical contour evolution machining, Process study

1 引言

整体结构式涡轮相对于叶片镶装式涡轮无零部件联接,零件数量大为减少,质量显著减轻,使发动机的推重比、寿命和安全性大为提高,因此在各类新型航空发动机中被大量采用。但这类涡轮工作在高温、高压、高转速条件下,选用不锈钢、合金钢、高温耐热合金等难加工材料,机械加工很困难,特别是对于有复杂空间型面的大扭曲度涡轮^[1],五坐标数控铣、精密铸造、电火花、仿形电解等传统加工方法经

试验均有其工艺局限性。采用片状阴极的展成式电解工艺,因一次加工可去除通道绝大部分余量,加之电解工艺生产率很高,表面质量好,展成式包络成形又具有数控技术柔性好的优势,可望成为大扭曲度整体涡轮盘加工的一种首选方法^[2~3]。

2 多轴联动数控编程

由于整体涡轮叶片型面的进气边(上表面)和排气边(下表面)与径向不平行^[1],型面设计只给出实体部分离散点数据,见图1(a),因确定阴极切入

收稿日期:2005-03-28;修回日期:2005-06-02

基金项目:“十五”国防科技预研项目(41318.3.2.4);中国博士后基金(2003034382)

作者简介:朱永伟,1966年出生,博士,从事特种加工新技术的教学与研究工作

和切出轨迹需要,必须对数据点进行拟合补全,图 1 (a)是叶片 y 截面(沿叶轮轴向)离散点数据连线,图 1(b)为按型面光滑要求进行补全后的拟合型线

(、、、、、表示在不同 y 坐标截面的型线),图 1(c)为叶片实体外形。

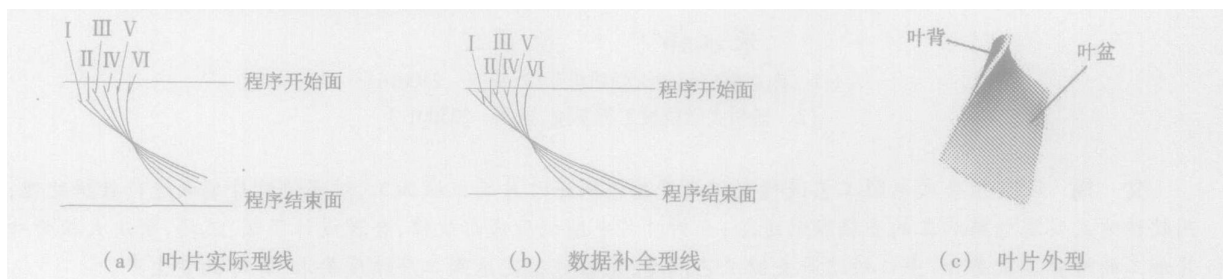


图 1 叶片型面

Fig 1 Blade surface

叶片型面须经拟合误差分析选择电解加工方式^[2]。在误差允许范围内,用直纹面拟合、线刃阴极多轴联动电解加工有工艺设计简便、生产率高、加工型面质量好的优点,此方法加工编程需要对叶片型面离散型数据行直线、曲面拟合,再根据加工精度插值加密,最后结合电解加工间隙生成阴极进给轨迹。本文讨论的整体涡轮可用直纹面拟计算,见图 2。

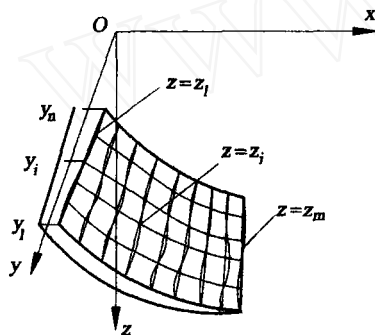


图 2 数据处理

Fig 2 Data processing

在各 z 截面进行直线拟合,设拟合直线方程为 $y = ax + b$,对各离散数据点 $p(x_i, y_i, z_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$),进行最小二乘误差计算,可得参数 a, b ,从而可得到各 z 截面拟合直线 $y = a_i x + b_i$ ($i = 1, 2, \dots, m$,为沿 z 向截面)。将直线拟合得到的 m 条直线向涡轮内外两个边界面 (y_1, y_n)求交点(各可得到 m 个点: P_1, P_2, \dots, P_m),以两个边界面内得到的由 m 个交点构成的两条曲线为基线,对叶片型面进行 3×1 次 B 曲面拟合,根据精度要求插值加密,可将整个型面分解为众多小曲面段,结合电解加工间隙,确定展成轨迹面^[4-5],由此可求解各进给轴运动参数。

在加工各小曲面段中,以各轴的匀速进给运动来合成展成运动轨迹,即“以线性近似非线性”,在各小分段曲面内的各轴进给量 $[x_i, y_i, z_i, i]$ 是匀速进给完成的,这样的近似处理方法在分段很密时的误差很小,完全可以满足电解加工的精度要求^[6]。采用组合式多轴联动数控系统,用虚实轴映射关系用软件方式实现四轴联动,四轴联动 ISO 标准 G代码编程格式:

$$N(n_0 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot n_3) \text{ G01 } U[x_i, y_i, z_i, i] W(w_i) F\left(\frac{w_i}{t_i}\right) \quad (1)$$

$N(n_0 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot n_3)$ 为程序号,各轴各段一一对应; G01表示直线插补; U, W 表示增量编程, U 参数 $[x_i, y_i, z_i, i]$ 为各轴实际进给量; w_i 为同步计数值,各轴对应程序段此值均相同;速度 $F\left(\frac{w_i}{t_i}\right)$,各轴对应段均相同, t_i 为各分段加工时间。

数控系统软件按长轴 w 以速度 $\frac{w_i}{t_i}$ 均匀插补,同时保证 $w_i [x_i, y_i, z_i, i]_{\max}$,将可保证四轴进给时 w 轴计数同步,各轴进给在各小段中“同时开始,同时结束”,从而实现曲面加工。

用 VC++ 6.0进行计算机辅助数控编程,用 EX-

CEL 建立叶片型面离散点数据文件,将数据用 C 语言函数读入内存数组,经曲面数据处理、后置处理,自动生成多轴联动数控电解加工程序。

3 成形规律分析

阴极左右刃边加工前导圆,其截形可简化为小圆角过渡。根据初始间隙、曲面分段参数及阴极圆角几何条件,用微分方程迭代,可解出沿加工轨迹各

处间隙,由型面与加工间隙可确定阴极进给轨迹,为多轴联动加工运动参数计算建立依据。

图 3(a)左端,与进给速度方向夹角 >90 部位,由于阴极与型面分离,电解液扩散,气泡增多,电解作用接近停止,已加工型面与进给方向近似平行,在 $=90$ 处预留电解加工间隙进行多轴联动数控编程,叶盆型面加工精度能够保证^[5-6]。

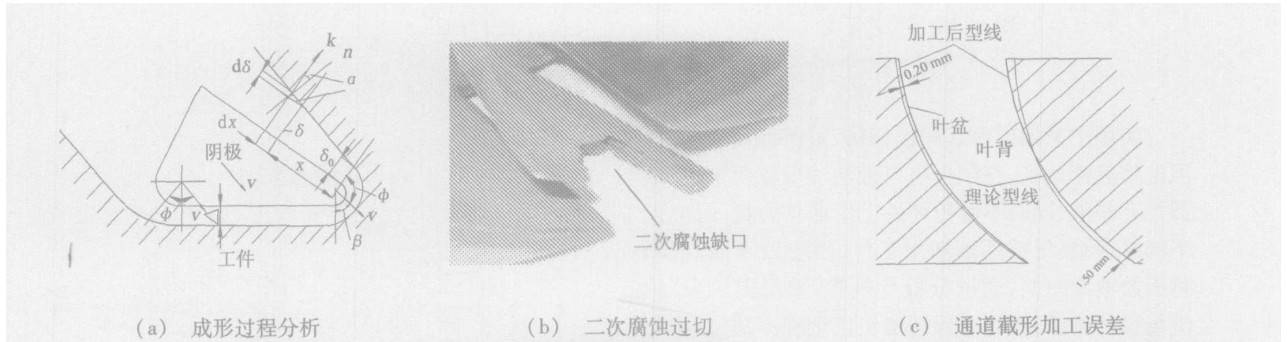


图 3 成形规律分析

Fig 3 Shaping law 's analysis

图 3(a)右端,由于特殊的位置关系,刃边外的阴极背部电解作用将持续,即二次腐蚀,开始时的间隙 δ_0 可由微分方程迭代求解,设背部 x 长度处增量 dx 对应间隙增量 $d\delta$,沿阴极背部方向间隙变化微分方程为:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{A}{\delta} - v\cos\varphi - v\sin\varphi \cdot \tan\alpha = \frac{A}{\delta} - v\cos\varphi - v\sin\varphi \cdot \frac{d\delta}{dx} \quad (2)$$

$\frac{d\delta}{dt}$ 为 φ 角处间隙变化速度;式中 $A = \eta\omega\kappa U_R$ 为电解加工中电、液综合参数,在一次加工中为常值; α 角为间隙方向 k 与工件表面法向 n 不重合夹角。

当阴极背部间隙过渡趋于平衡时,二次腐蚀间隙达到最大,此时:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{A}{\delta} - v\cos\varphi - v\sin\varphi \cdot \frac{d\delta}{dx} = 0, \text{ 令 } \Delta_b = \frac{A}{v}, \text{ 有:}$$

$\int_{\delta_0}^{\delta} \frac{\delta \cdot \sin\varphi}{\Delta_b - \delta \cdot \cos\varphi} d\delta = \int_0^x dx$, 两边求解定积分,可得间隙 δ 解析解,为隐函数方程:

$$\ln \frac{\Delta_b - \delta_0 \cdot \cos\varphi}{\Delta_b - \delta \cdot \cos\varphi} = \frac{x \cdot \cos^2\varphi}{\Delta_b \cdot \sin\varphi} + \frac{\delta - \delta_0}{\Delta_b} \cdot \cos\varphi \quad (3)$$

由上式可求出在背部 x 处的间隙,当 $\Delta_b = \frac{A}{v} = 0.30$ mm, $\varphi = 84.5^\circ$, $x = 15$ mm, $\delta_0 = 0.45$ mm 时, $\delta = 2.15$ mm,这样大的二次腐蚀间隙,零件会因此超差报废,试验中将叶片电解出缺口,见图 3(b),缺口还会使加工区因漏水引起缺液短路,实际加工必须解决二次腐蚀过切问题,图 3(c)为以叶盆面为编程基准,在一定参数条件下电解加工后测量的叶间通道截形误差。

4 阴极、流场及工艺系统设计

大扭曲整体涡轮叶片型面扭曲度大, x 轴及旋转轴进给量很大,加工区电解液流速波动大,且型面扭曲弯转,造成流场变化复杂,设计阴极必须要保证加工面供液充分,不存在缺液区,否则在缺水区由于电解作用弱,易于产生短路,整体涡轮叶片有一处短路,将使加工件整体报废,造成重大经济损失。

阴极采用组合式结构,即阴极本体加底板的复合结构,加工工艺系统见图 4,由于阴极本体的制造过程相当复杂,成本较高,这样设计的优点是试验过程中如发生短路,只是底板发生烧伤,阴极本体可受到保护。

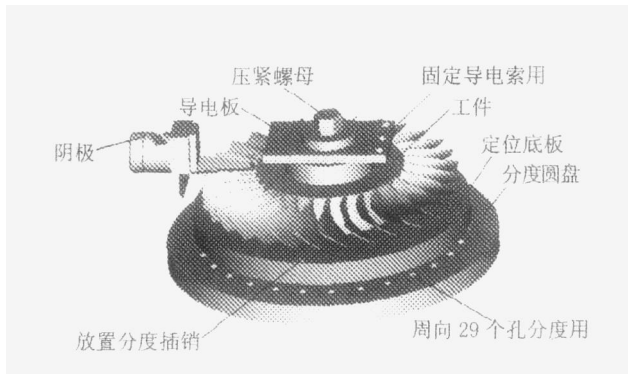


图 4 加工工艺系统

Fig 4 Process system

实用中采用内喷式阴极结构,可保证足够压力,因电解液流速高,在阴极出口处前冲现象严重,在根部常有缺液;同时本叶轮坯件上下面均为斜面,加工下部时,阴极尾部逐渐切出工件,因压力降低,前部将因缺液而短路,通过分析及试验,采用图 5 (b)的流场设计方法,这样可保证加工区全程不缺液,避免产生火花和短路故障。

阴极出液口采用窄缝式结构,根据宽度 $b > 2b_0$ 的原则及本阴极加工时的特点,采用前端 1.0 mm、尾部 2.0 mm 的窄三角缝结构。阴极结构设计须保证在整个加工轨迹上无干涉、过切,因此在阴极本体及阴极底板截面形状设计时必须进行验算,且保证满足下列条件。

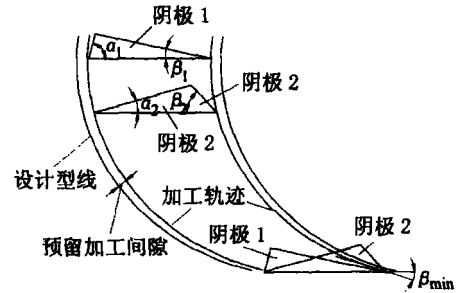
(1)加工全程阴极展成进给运动所形成的包络面与已加工面及工件无轨迹干涉,见图 5 (a),阴极结构方式 2 的右端斜角 β_2 过大,加工到下部将发生干涉,而方式 1 无干涉可以采用;同时为了减小叶片背部的二次腐蚀过切,尽量减小 β 角,设计时应满足:

$$\beta_{\min} = \arctg \frac{p_m(z) - p_{m-1}(z)}{p_m(x) - p_{m-1}(x)} \quad (4)$$

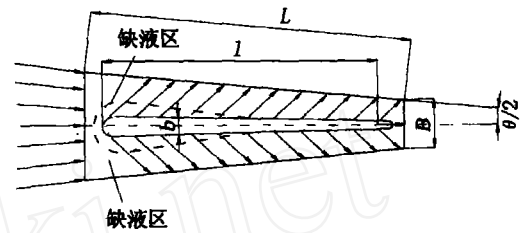
式中, p_m 为直线拟合后边界内的第 m 点。为了保证阴极刚性及过流面积, β 角可适当加大。

二次腐蚀过切,见图 3 (b),必须避免,防止措施:一是阴极背部采用绝缘措施,用绝缘材料涂覆或粘贴绝缘膜;二是将背部二次腐蚀部位尽量切薄或局部修磨,但腔壁须保留一定厚度,不能漏水;三是在组合式阴极结构设计中,将阴极底板右刃边预留一尺寸为 x 的凸缘,同时将阴极背部二次腐蚀处用线切割切薄 y (腔壁厚须保留 0.5 mm 以上),见图 6

(a),当阴极背部沿法向有效减薄量 $t = x \sin \beta + y$ 2.0 mm 时,由于间隙增大、气泡扩散,电解二次腐蚀大为减小。试验中采用措施三,效果显著,消除二次腐蚀后的叶片如图 6 (b) 所示。



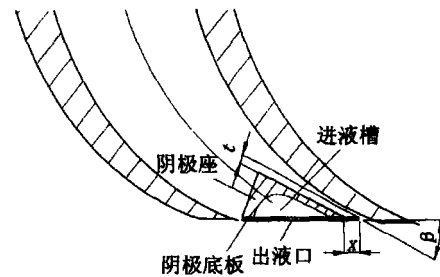
(a) 阴极截形设计



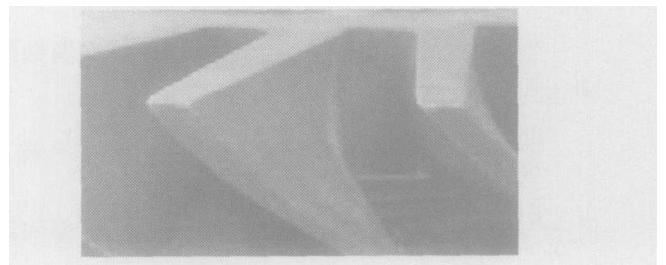
(b) 流场设计

图 5 阴极设计

Fig 5 Cathode designing



(a) 阴极结构修正



(b) 消除叶背二次腐蚀的叶片

图 6 二次腐蚀过切消除

Fig 6 Eliminating extra machining in blade back

(2) 保证加工后的叶片在所有位置形状不起差,即阴极底板尺寸:斜边长 L 、小端宽度 B 、斜角须按下式推算选取。

$$\begin{cases} L & (L_b^i, L_p^i)_{\max} + L_0 \\ B & (B^i)_{\min} - B_0 \\ & (i)_{\min} \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (5)$$

式中, L_b^i 、 L_p^i 、 B^i 、 i 分别为在 i 截面叶背型线长度、叶盆型线长度、根部槽宽及槽间斜角, L_0 、 B_0 分别为斜边预留长度、叶根部加工间隙与预留余量之和。

5 工艺试验

对大扭曲叶片涡轮盘进行加工试验,在泵入口及机床管路入口设置滤网,进行二级过滤,加工区流

出电解液经过两次沉淀再流向供液槽,管路压力由溢流阀调节,温度由电热器和冷风扇自动控制一定范围内,加工区产生的各种气体由排气装置排出。

电解液为 25% NaNO_3 溶液,温度保持 $32 \sim 36$,进口压力 0.70 MPa,初始端面间隙 0.5 mm,加工电压 15 V,阴极 z 向进给速度在 $0.60 \sim 1.0$ mm/min 变化,以适应型面不同扭曲度处的加工要求。

加工过程流场稳定,加工后叶片表面无电解流纹及金相组织缺陷。以叶盆型面为基准,进行多轴联动编程加工。叶片型面测量方法及精度如图 7 所示,其中叶盆面加工精度可达 0.20 mm,叶背面最大余量 0.60 mm,可稳定达到工序精度要求。

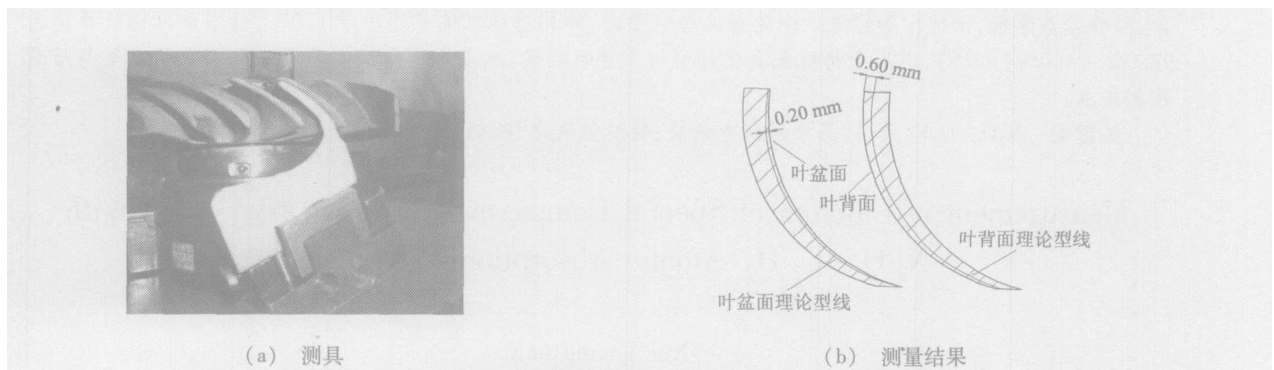


图 7 叶片型面测量方法

Fig 7 Measuring accuracy and result

6 结论

用片状组合式阴极展成电解加工整体涡轮能很有效地去除叶间通道加工余量,有数控的柔性及电解高效率、表面质量好的优势,是难加工材料大扭曲叶片整体涡轮加工的有效方法。合理设计展成电解加工阴极、流场,增加补液结构,能有效解决大扭曲叶片电解加工时出口处(排气边)短路问题;采取措施减小阴极右刃斜角及背部厚度,叶背面二次腐蚀过切可以消除;在此基础上,完善加工工艺系统,保证加工过程参数稳定,涡轮叶片加工将具有很好的精度重复性,此工艺已可用于大扭曲叶片整体涡轮的批量加工。

参考文献

1 朱永伟,徐家文. 整体构件异形曲面电解加工运动

分析与设计. 宇航材料工艺, 2005; 35(3): 47~53

2 朱永伟,徐家文等. 异形曲面电解加工进给运动设计. 见: 2003 全国特种加工会议论文集, 2003: 81~85

3 薛林强. 整体涡轮数控展成电解加工的工艺设计. 南京航空航天大学硕士学位论文, 2004

4 Xu Jiawen, Tang Yaxin, Yun Naizhang. The investigation on the shaping law of NC - ECCM (Electrochemical Contour Evolution Machining) with a rotating cathode. In: Proceeding of the sixth international manufacturing conference, Hong Kong: MCC, 1993: 97~100

5 朱永伟,徐家文,胡平旺等. 数控展成电解加工的研究与应用. 航空学报 2001; 7(4): 376~378

6 朱永伟,徐家文. 电解加工直纹型面叶片的误差分析与补偿. 扬州大学学报, 2003; 8(3): 39~44

(编辑 李洪泉)